

Wibowo Implementasi Metode Optimasi *Particle Swarm Optimization* (Pso) untuk Tuning Pengendali *Model Predictive Control* (Mpc) pada *Quadruple Tank*

Kamal Fu'ad, Bambang L. Widjiantoro

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: blelono@ep.its.ac.id

Abstrak— Pada penelitian ini telah dibangun mode kontrol *Model Predictive Control* (MPC) dengan metode optimasi *Particle Swarm Optimization* untuk mencari nilai terbaik pada parameter beban sinyal kontrol W_u dan sinyal control error $W_{\Delta u}$ yang kemudian diimplementasikan secara *online* pada rancang bangun system *Quadruple Tank*. Metode IMOPSO untuk MPC dengan nilai sinyal control $W_u = 0.0076$ dan sinyal control error $W_{\Delta u} = 0.1221$ menghasilkan respon system terbaik dengan *maximum overshoot* = 4% *error steady state* 1% *settling time* 55 detik dibandingkan MOPSO dengan nilai sinyal control W_u 0.0397 dan sinyal control error $W_{\Delta u}$ 0.1780 menghasilkan respon sistem dengan maksimum overshoot = 5% *Error Steady State* = 3 % *settling time* 65 detik. Selain itu, dibangun juga control PSO – PID yang digunakan sebagai pembanding dimana mode MOPSO menghasilkan nilai $K_p = 3.0828$ $K_i = 0.4219$ memiliki respon sistem dengan maksimum overshoot = 3 % *Error Steady State* = 2% dan *settling time* 250 detik. Sedangkan pada mode IMOPSO nilai $K_p = 2.9388$ $K_i = 0.2166$ memiliki respon system dengan maksimum overshoot = 3 % *Error Steady State* 1.5% dan *settling time* 150 detik.

Kata kunci : *Quadruple Tank*, *Particle Swarm Optimization*, *Model Predictive Control*

I. PENDAHULUAN

Sebuah sistem kontrol memerlukan banyak asumsi untuk memecahkan masalah ketidaklinieran pada sistem *multi input-output* [1]. Kerangka berpikir dalam menentukan asumsi tersebut menjadi topik utama untuk membangun sebuah kontrol yang baik : batasan apa yang tepat digunakan dalam suatu sistem kontrol multivariabel? Karl Henrik Johansson [2] menggunakan mode proses *non-minimum phase* dan *minimum phase* untuk mengatasi ketidaklinieran sistem multivariabel dengan kontrol PI. Karl berkesimpulan bahwa sistem multi variabel lebih mudah dikontrol pada proses *non-minimum phase* dengan *settling time* 40% lebih baik dari mode proses *minimum phase*. Bagaimanapun, teknik yang digunakan tidak dapat memecahkan masalah ketidaklinieran pada sistem multi input-output dengan sama baiknya pada kedua mode proses tersebut.

Pada skala laboratorium, *Quadruple tank* digunakan sebagai pembelajaran ketidaklinieran dalam sistem multivariabel [2]. Terdiri dari empat tangki air yang saling berhubungan dan dua buah pompa, *Quadruple Tank* mempunyai tujuan untuk menjaga ketinggian dua buah tangki bawah dan dua buah tangki atas sebagai elemen pengganggu.

Terdapat dua buah input aliran air yang dapat diatur untuk mengedalikan kedua keluaran yang berupa ketinggian, sehingga sistem ini memiliki dinamika yang multivariabel karena setiap tangki mempengaruhi ketinggian dari tangki yang lainnya [3]. Variabel kontrol pada *Quadruple Tank* berupa tegangan input pompa yang bisa dikendalikan untuk mengontrol ketinggian air pada kedua tangki bawah tersebut.

Dilatarbelakangi oleh hasil kerja Karl Henrik Johansson [2], Ayala, Helon Vicente Hultmann, Coelho, Leandro dos Santos [4] telah berhasil membangun sistem kontrol pada *Quadruple Tank* dengan menggunakan sistem optimasi MOPSO dan IMOPSO. Skala simulasi yang dibangun berhasil menunjukkan sistem kontrol terbaik berupa IMOPSO dengan *settling time*, *Error Steady State*, dan *maximum overshoot* dalam mode proses *plant non-minimum phase* dan *minimum phase*.

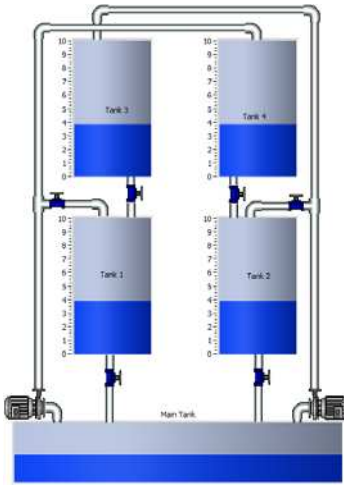
Pada tugas akhir ini, dibangun sebuah kontrol sistem menggunakan PSO - MPC yang diimplementasikan pada *plant Quadruple Tank* proses secara *real-time* untuk mengetahui dan mempelajari penerapan ilmu dari buku dan jurnal penelitian dalam bidang kontrol multi variabel. Tugas Akhir ini diharapkan dapat menerapkan PSO yang dapat mengatasi masalah optimasi multi input dan ketidaklinieran [5], juga menerapkan hasil penelitian Ayala, Helon Vicente Hultmann, Coelho, Leandro dos Santos [4] MOPSO dan IMOPSO untuk kontrol MPC pada *plant Quadruple Tank* yang sesungguhnya.

II. URAIAN PENELITIAN

A. *Quadruple Tank*

Quadruple tank merupakan kombinasi dari empat buah tangki, tangki 1 dan 2 dipasang di bawah dua tangki lainnya (tangki 3 dan 4) untuk menerima aliran air dengan gaya gravitasi. Terdapat satu buah tangki utama, dua buah pompa dan dua buah katup untuk perekrayaan sistem dinamik aliran air. Pompa 1 dan 2 menghisap air dari tangki utama untuk kemudian disalurkan keempat tangki, dimana keempat tangki tersebut saling berinteraksi sesuai dengan gambar 1. Interaksi antar tangki tersebut membuat proses lebih rumit dan merupakan sumber dari ketidaklinieran.

Gambar diagram blok dari *Quadruple tank* proses dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

Gambar. 1. Sistem *Quadruple Tank*

Persamaan Matematis *Quadruple Tank* didapat dari persamaan hokum Bernoulli. K. H Johansson pada jurnalnya telah membangun persamaan model matematis seperti di bawah ini :

$$\text{Persamaan Tangki 1} \\ \frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1}V_1 \quad (1)$$

$$\text{Persamaan Tangki 2} \\ \frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2}V_2 \quad (2)$$

$$\text{Persamaan Tangki 3} \\ \frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3}V_2 \quad (3)$$

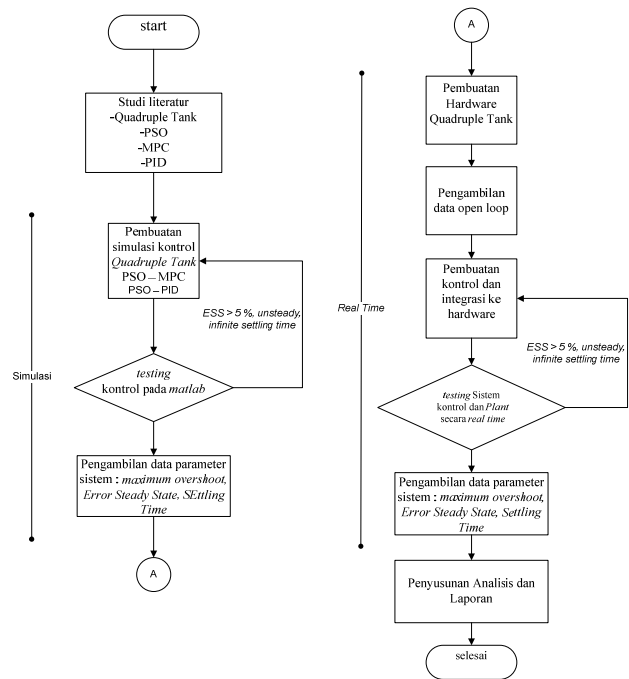
$$\text{Persamaan Tangki 4} \\ \frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4}V_1 \quad (4)$$

Keterangan :

| | |
|----------------------|---|
| h_1, h_2, h_3, h_4 | : Ketinggian air pada tangki 1, 2, 3, dan 4 (cm) |
| a_1, a_2, a_3, a_4 | : Luas keluaran pada tangki 1, 2, 3, dan 4 (cm ²) |
| A_1, A_2, A_3, A_4 | : Luas permukaan tangki 1, 2, 3, 4 (cm ²) |
| γ_1 | : Perbandingan laju aliran tangki 1 dan 4 |
| γ_2 | : Perbandingan laju aliran tangki 2 dan 3 |
| k_1, k_2 | : Gain dari pompa 1, 2 (cm ³ /V S) |
| V_1, V_2 | : Tegangan pompa 1, 2 (Volt AC) |
| g | : Konstanta gravitasi (m/s ²) |

B. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa tahap percobaan, dimana tahap percobaan tersebut dilakukan untuk dapat merealisasikan kontrol PSO – MPC pada system plant *Quadruple tank* secara *real time*. Langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini :



Gambar. 2. Diagram alir penelitian tugas akhir

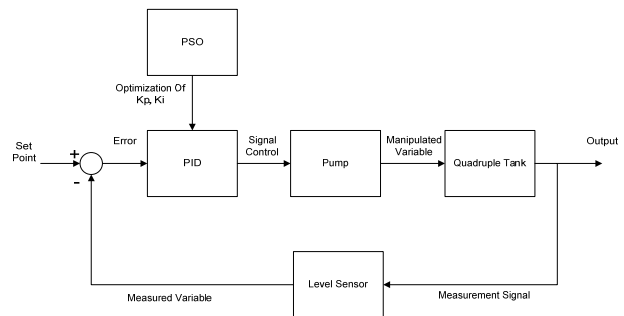
Testing simulasi dan *real time* bertujuan untuk menguji keberhasilan logika kontrol yang telah disusun. Jika pengujian berhasil maka data yang sebenarnya sudah bisa diambil dan dibandingkan

C. Penerapan Sistem Pengendalian

PSO digunakan untuk *tuning* parameter K_p dan K_i pada kontrol PID dan parameter W_u dan W_{du} pada MPC

1. PSO - PID

Logika dari PSO akan menentukan respon sistem yang paling baik karena parameter K_p dan K_i telah dioptimasi untuk memberikan pergerakan variabel lebih efisien.



Gambar. 3. Diagram Blok PSO PID

$$J = \sum_{i=0}^n \alpha * IAE(i) + \beta |o(i)| \quad (5)$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (6)$$

$$v_i^p(k+1) = \lambda v_i^p(k) + c_1(pbest + x_i^p(k)) + c_2(gbest + W_i^p(k)) \quad (7)$$

$$pbest(k+1) = x_i^p(k) + pbest(k+1) \quad (8)$$

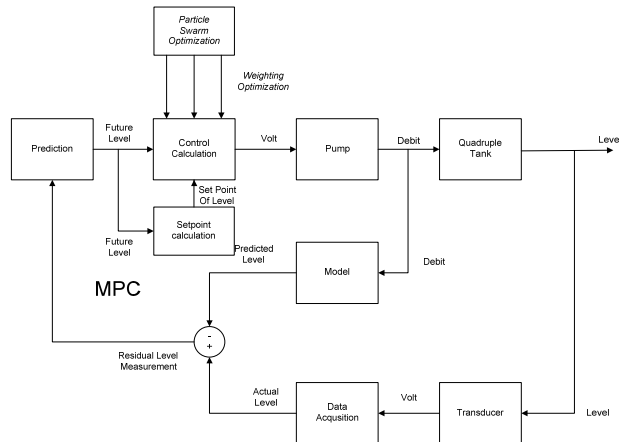
$$pbest^p = \underset{(p=1, \dots, P)}{\operatorname{argmax}} \{F(Kp^p \text{ } Ki^p(l) | l=0, 1, \dots, k)\} \quad (9)$$

$$gbest = \operatorname{argmax} \{F(Kp^{pbest}, Kp^{pbest}(l)) | (p=l, \dots, P)\} \quad (10)$$

Fungsi objektif pada persamaan 3.1 menunjukkan bahwa IAE dan output digunakan untuk logika PSO

2. PSO - MPC

Pada penelitian ini, PSO digunakan untuk melakukan optimasi pada variable *weight output* (W_y), *weight control* (W_u) dan *weight control error* ($W_{\Delta u}$) dalam MPC [1].



Gambar. 4. Diagram Blok PSO PID

Model *Predictive Control* (MPC) adalah salah satu desain untuk sistem kontrol yang mengkonfigurasi sistem *feedback* dengan mengulangi secara *online* proses input dari *plant*.

$$J = \sum_{i=0}^{Hp-1} \{ ||Wy(i)[r(k+i+1)-y'(k+i+1)]||^2 + \frac{Wu(i)u'[k+i]}{||\Delta u(k+i)||^2} + ||W\Delta u(i)\Delta u'(k+i)||^2 \} \quad (11)$$

$$\Delta u'(k+i) = u'(k+i) - u'(k+i-1) \quad (12)$$

$$f_i = I/G_i \quad (13)$$

$$G_i = (1 - e^{-\beta})(E_{ssj} + M_{pi}) + e^{-\beta}(t_{si} - t_{ri}) \quad (14)$$

$$M_{pi} = 100 \times \frac{M_{pi}}{y_{tmax}} \quad (15)$$

$$v_i^p(k+1) = \lambda v_i^p(k) + c1(W_i^{pbest} + W_i^p(k)) + c1(W_i^{gbest} + W_i^p(k)) \quad (16)$$

$$W_i^p(k+1) = W_i^p(k) + v_i^p(k+1) \quad (17)$$

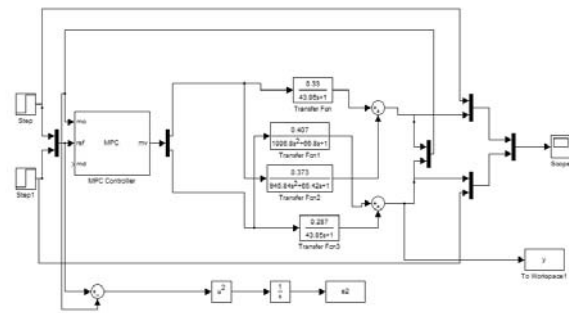
$$pbest^p = \operatorname{argmax} \{F(W^p(l)) | l=0, 1, \dots, k\}, (p=1, \dots, P) \quad (18)$$

$$gbest = \operatorname{argmax} \{F(W^{p_{bestp}}(l) | (p=1, \dots, P))\} \quad (19)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

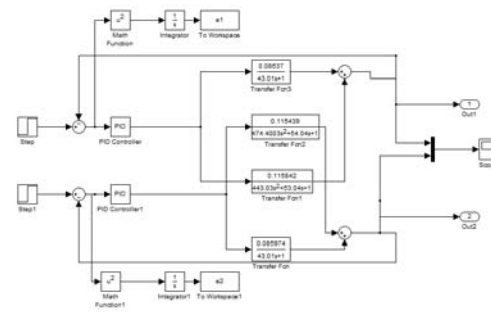
A. Simulasi

Pada penelitian ini telah dibangun perancangan simulasi sistem plant *quadruple tank* dalam perangkat lunak



Gambar. 5. Pemodelan untuk MPC

Model matematis pada bab 2 digunakan untuk mengisi fungsi transfer pemodelan pada perangkat lunak.



Gambar. 6. Pemodelan untuk simulasi Perangkat lunak

Dalam simulasi ini, satu blok PID untuk mengendalikan satu pompa dimana pompa pertama mengalirkan fluida ke tangki 1 dan 4, pompa kedua mengalirkan tangki 2 dan 3.

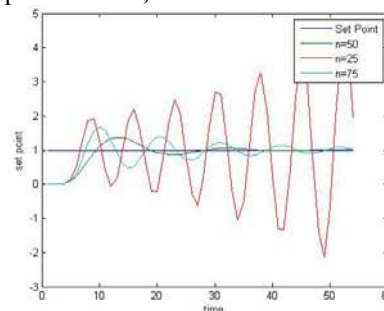
1. Simulasi PSO – PID

Multivariable Objective PSO dan *Improved Multivariable Objective PSO* adalah metode PSO yang dilakukan dalam penelitian ini.

Tabel 1.
MOPSO PID

| | n=25 | n = 50 | n = 75 |
|----|--------|--------|--------|
| Kp | 3.7253 | 3.0828 | 4.4652 |
| Ki | 3.6253 | 0.4219 | 1.4490 |
| Kd | 0 | 0 | 0 |

Pada mode optimasi menggunakan MOPSO yang diterapkan pada kontrol PID, variable yang dioptimasi adalah nilai Kp dan Ki dengan jumlah partikel yang divariasikan pada nilai 25, 50 dan 75.



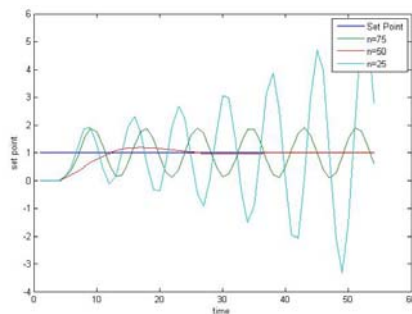
Gambar. 7. Grafik simulasi MOPSO PID

MOPSO pada 50 buah partikel, *maximum overshoot* sebesar 4%, *errorsteady state* sebesar 0% dan *settling time* selama 40 detik.

Tabel 2.
IMOPSO PID

| | n=25 | n = 50 | n = 75 |
|----|--------|--------|--------|
| Kp | 3.1475 | 2.9388 | 3.4197 |
| Ki | 3.6647 | 0.2166 | 2.4277 |
| Kd | 0 | 0 | 0 |

Dengan mode optimasi menggunakan IMOPSO yang diterapkan pada kontrol PID, variabel yang dioptimasi adalah nilai Kp dan Ki dengan jumlah partikel yang divariasikan pada nilai 25, 50 dan 75.



Gambar. 8. Grafik simulasi IMOPSO PID

IMOPSO pada 50 buah partikel, *maximum overshoot* sebesar 3%, *errorsteady state* sebesar 0% dan *settling time* selama 37 detik.

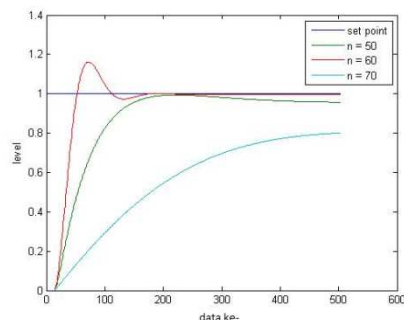
2. Simulasi PSO – MPC

Telah dilakukan percobaan metode optimasi menggunakan PSO untuk menentukan *weighting* pada mode kontrol MPC. Jumlah partikel pada PSO – MPC ini dibatasi untuk 50, 60 dan 70..

Tabel 3.
Tabel MOPSO – MPC

| | N = 50 | N = 60 | N = 70 |
|----------------|--------|--------|--------|
| W_u | 0.0165 | 0.0045 | 0.0397 |
| $W_{\Delta u}$ | 0.1820 | 0.1777 | 0.1780 |

Setelah mendapatkan konfigurasi nilai *weighting*, konfigurasi tersebut dimasukkan ke dalam blok simulink MPC.



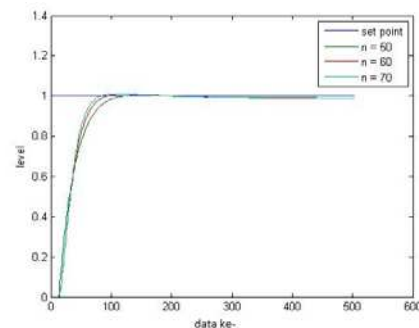
Gambar. 9. Grafik Simulasi MOPSO – MPC

Sumbu x pada grafik ini bukan berupa waktu tapi data ke – yang mempunyai *sampling time* 0.1 detik, jadi *settling time* berpartikel 60 hanya 12 detik, dengan *maximum overshoot* 2% dan *error syeady sate* sebesar 0 %.

Tabel III.
IMOPSO – MPC

| | n = 50 | n = 60 | n = 70 |
|----------------|--------|--------|--------|
| W_u | 0.0087 | 0.0082 | 0.0076 |
| $W_{\Delta u}$ | 0.0212 | 0.1174 | 0.1221 |

Setelah mendapatkan konfigurasi nilai *weighting* pada control MPC, konfigurasi tersebut dimasukkan ke dalam blok simulink MPC untuk dianalisa seperti pada respon sistem sebelumnya



Gambar. 10. Grafik Simulasi MOPSO – MPC

Settling time dari respon sistem dengan konfigurasi *weighting* PSO berpartikel 70 hanya 9 detik, dengan *maximum overshoot* dan *error syeady sate* sebesar 0 %.

B. Real – Time

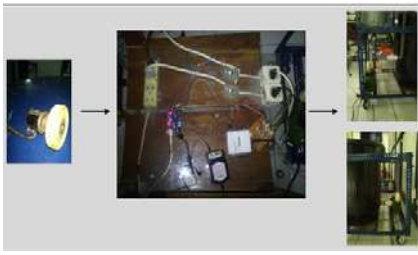
1. Desain Quadruple Tank

Permasalahan pada pompa dan kebocoran pada tangki utama pada penelitian sebelumnya menjadi masalah utama yang berpengaruh besar pada inisialisasi plant.



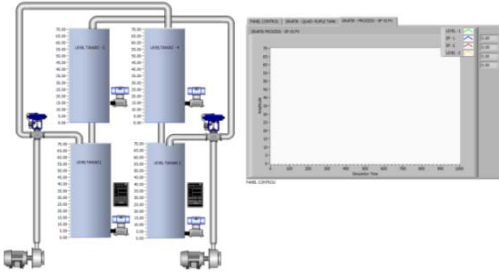
Gambar. 11. Desain quadruple tank

Perancangan elektrik untuk plant *Quadruple Tank* menggunakan potensiometer sebagai sensor, DAQ, Arduino dan TRIAC sebagai pengkondisi sinyal, Perangkat lunak sebagai pemrograman logika kontrol MPC dan PID sekaligus sebagai tampilan sistem *quadruple tank*..



Gambar. 12. Perancangan elektrik

Pada *interface* Perangkat lunak dapat mengendalikan setpoint dan bermacam – macam parameter MPC dan PID seperti K_p , K_i , W_u , dan W_d .



Gambar. 13. Interface Quadruple Tank

Dari pengukuran didapatkan untuk mendapatkan data voltase DC - AC yang mengendalikan pompa dan jumlah debit fluida

Tabel 2.
Inisialisasi *quadruple tank*

| Dimensi | Nilai |
|---|---------------------------|
| A1, A2, A3, A4 (cm ²) | 390 |
| a1, a2 (cm ²) | 2.75 |
| a3, a4 (cm ²) | 5.3 |
| y1,y2 | 0.428 ; 0.426 |
| T1, T2, T3, T4 (sekon) | 43.01; 43.01; 10.3; 11.03 |
| K pompa 1 dan 2 | 1.83 |
| Kc | 1 |
| Gain Pompa 1 dan 2 (cm ³ /V s) | 1.83 |

Dari tabel inisialisasi diatas dapat dilihat bahwa *gain* dari kedua pompa sama yaitu sebesar 1.83 cm³/V s.

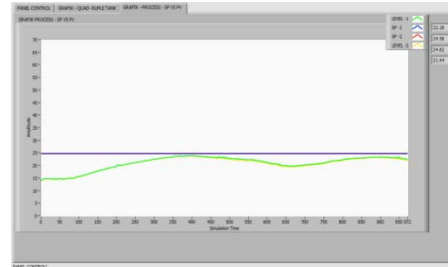
Tabel 3.
Spesifikasi Pompa 1

| VDC (Volt) | VAC (Volt) | Q (Liter/Menit) |
|------------|------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 44 | 4.83 |
| 2 | 90 | 9.89 |
| 3 | 138 | 15.16 |
| 4 | 185 | 20.33 |
| 5 | 220 | 24.18 |

Tabel 4.
Spesifikasi Pompa 2

| VDC (Volt) | VAC (Volt) | Q (Liter/Menit) |
|------------|------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 46 | 5.05 |
| 2 | 90 | 9.88 |
| 3 | 138 | 15.15 |
| 4 | 183 | 20.09 |
| 5 | 220 | 24.18 |

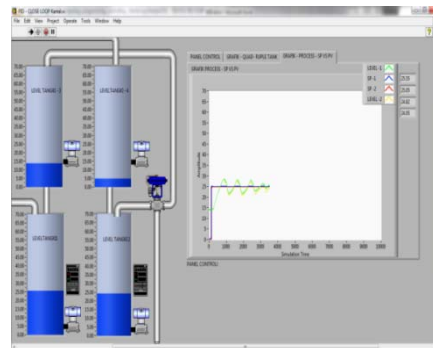
Dari kedua tabel diatas menunjukkan masalah dalam penelitian sebelumnya telah teratasi.

Gambar. 14. Respon sistem *open loop*

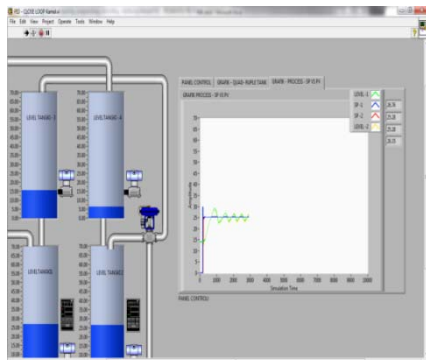
Pada respon sistem *open loop*, terlihat variabel level yang diukur tidak mampu mencapai *setpoint* yang diinginkan, maka padapenelitian ini dibangun dua buah mode kontrol yaitu PSO – MPC dan PSO – PID secara *real time*.

2. PSO – PID

Dalam mode kontrol PSO – PID, parameter K_p dan K_i terbaik dalam simulasi perangkat lunak diambil, kemudian dilakukan testing secara *real – time*.

Gambar. 15. Grafik *real time* MOPSO PID n = 50

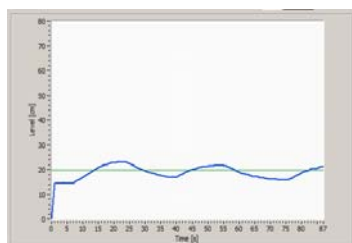
Pada mode MOPSO dengan 50 buah partikel menghasilkan nilai $K_p = 3.0828$ $K_i = 0.4219$ memiliki respon sistem dengan *maksimum overshoot* = 3 % *Error Steady State* = 2% dan *settling time* 250 detik

Gambar. 16. Grafik *real time* MOPSO PID $n = 50$

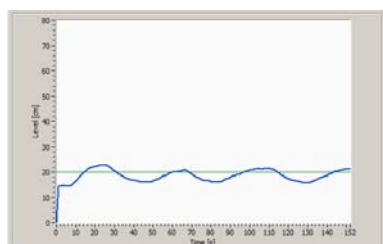
Sedangkan pada mode IMOPSO dengan 50 buah partikel menghasilkan nilai $K_p = 2.9388$ $K_i = 0.2166$ memiliki respon sistem dengan *maximum overshoot* = 3 % *Error Steady State* 1.5% dan *settling time* 150 detik

3. PSO – MPC

Persamaan ruang keadaan pada domain diskrit digunakan pada perhitungan kontrol MPC sehingga MPC dapat memprediksi langkah selanjutnya dari output sistem

Gambar. 17. Grafik *Real - time* MOPSO MPC $n = 60$

Untuk MOPSO nilai sinyal control W_u dan sinyal control error W_{du} adalah 0.0397 dan 0.1780 menghasilkan respon sistem dengan *maximum overshoot* = 5% *Error Steady State* = 3 % *settling time* 65 detik.

Gambar. 18. Grafik *Real - time* IMOPSO MPC $n = 70$

Sedangkan untuk IMOPSO nilai sinyal control W_u dan sinyal control error W_{du} adalah 0.0076 dan 0.1221 menghasilkan respon sistem dengan *maximum overshoot* = 4% *error steady state* 1% *settling time* 55 detik

IV. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan untuk penelitian *quadruple tank* yaitu :

1. Kontrol MPC mampu menghasilkan respon sistem yang baik dengan menggunakan mode tuning *Particle Swarm Optimization*, simulasi mode tuning IMOPSO

– MPC menunjukkan hasil yang sangat baik dengan *settling time* dari respon sistem hanya 9 detik, *maximum overshoot* dan *error steady state* sebesar 0 %

2. Untuk implementasi secara *real time* , IMOPSO – MPC menghasilkan respon sistem yang berbeda dengan simulasi, *maximum overshoot* = 4% *error steady state* sebesar 2% dan *settling time* selama 55 detik. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan aktuator, atau dalam penelitian ini adalah berupa pompa AC, untuk mengikuti sinyal kontrol yang diberikan. Pompa AC tidak memiliki *respon time* untuk mengikuti sampling time sebesar 0.1 detik seperti yang dilakukan oleh simulasi.
3. Getaran pada plant yang disebabkan oleh pompa yang bergetar pada rangka menyebabkan keempat sensor ikut bergetar dan bisa menghasilkan kesalahan atau *error* yang signifikan pada respon sistem yang di analisa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh dosen dan staff pengakar jurusan Teknik Fisika, dan seluruh Mahasiswa Teknik Fisika, atas kesan-kesan yang pernah saya buat di jurusan ini bersama beliau-beliau dan teman-teman sekalian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suzuki, R., Kawai, F., Ito, H., Nakazawa, C., Fukuyama, Y. & Aiyoshi, E., "Automatic Tuning of Model Predictive Control using Particle Swarm Optimization," *IEEE*, 2007.
- [2] Johansson, K. H., "The Quadruple-Tank Process : A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero," *IEEE*, vol. 8, 2000
- [3] Yani, P. & Widjiantoro, B. L., "Implementasi Sistem Pengendalian Model Predictive Control pada Quadruple Tank Process," 2011.
- [4] Ayala, H. V. H. & Coelho, L. S. , "Controller Tuning using Multiobjective Particle Swarm Optimization Applied to a Quadruple-Tank Process," *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. IV, pp. 72-79, 2010.
- [5] Kennedy, J. & Eberhart, R. C., "Particle Swarm Optimization," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Neural Networks*, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.